

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ РАСТРОВОЇ ГІДРОЛОГІЧНО-КОРЕКТНОЇ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ МІКРО- ТА МЕЗОРЕЛЬЄФУ ЗАСОБАМИ ГІС GRASS

В.Р. Черлінка, кандидат біологічних наук, доцент
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

Розглянуто можливості побудови растрової гідрологічно-коректної цифрової моделі мікро- та мезорельєфу засобами ГІС GRASS з врахуванням структурних ліній антропогенного та природного походження. Показано, що для отримання адекватних результатів необхідно включати в базову цифрову картографічну модель рельєфу, яка є основою GRID-ЦМР, додаткові 2,5 та 3d-лінії та застосовувати апроксимацію регуляризованими напруженими сплайнами.

Ключові слова: цифрова модель рельєфу (ЦМР), регуляризовані напружені сплайни, структурні лінії, ГІС GRASS.

Постановка проблеми. Поширення сфер застосування та вдосконалення технологій побудови цифрових моделей рельєфу є процесом, що наразі стрімко розвивається. Зумовлено це насамперед технологічним розвитком в таких галузях, як дистанційне зондування, обробка зображень та сигналів, технології комп'ютерного бачення тощо [1, 2]. Хоча дистанційні методи, зокрема LIDAR, дозволяють економити ручну працю, отримані таким способом дані часто не є ідеальними з точки зору надійності щодо тривимірної поверхні. Тому в областях, які є критичними для опису поверхні, необхідно додавати характерні деталі, зокрема структурні лінії, які є лінійними елементами, що описують зміни безперервності поверхні [3, 4]. Тим більше це стосується ЦМР, генерованих з вихідного топографічного матеріалу, де свої похибки часто вносить використовуваний метод інтерполяції висот [5]. Тому особливо актуальним завданням є інтеграція структурних ліній в дані ЦМР мікро- та мезомасштабів, які є основою гідрологічно-коректного моделювання – бази для досліджень проблем водної ерозії.

Аналіз останніх наукових досліджень та публікацій. Існуючі на сьогоднішній день два класи моделей рельєфу

© Шебанін В.С., Кормишкін Ю.А., Данильченко Р.В., 2013

(растрові та TIN) забезпечують складну номенклатуру завдань [6]. Проте у ряді випадків є певні застороги щодо точності отриманих з їх використанням результатів, зокрема при моделюванні водної ерозії земель. Так «ламаність» поверхні відтвореного рельєфу, на основі нерегулярної мережі трикутників, значно погіршує, а в ряді випадків (долини річок та слабо пологий рельєф) унеможливає проведення коректного гідрологічного аналізу [7]. Наразі є розробки, які досить успішно намагаються мінімізувати згадані ефекти [5, 8], проте класичним видом моделей при проведенні такого роду досліджень залишаються растрові ЦМР [9, 10]. Одним з їх недоліків є понижена здатність до інтеграції так званих структурних ліній рельєфу, до яких входять нативні орографічні лінії та лінії змін поверхні антропогенного походження [11].

Реконструкція цифрової моделі рельєфу з горизонталей визнається одним з найбільш поширених способів отримання ЦМР [6, 12, 13]. Саме тому реалізація методичних підходів до імплементації структурних ліній у растрові моделі рельєфу з метою їх найкоректнішого відтворення є важливим завданням [14]. Крок моделі при цьому має відповідати масштабу карти, задачам моделювання та якісного відображення запроєктованих структурних ліній [15, 16].

Сучасні алгоритмічні методи досить непогано відворюють з горизонталей природні орографічні лінії, зокрема брівки, підосви, тальвеги, вододіли. А от здатність ЦМР, класично екстрапольованих з горизонталей, відтворювати лінії дискретних природних та штучних змін рельєфу (яри, ярочки, ритвини, промоїни, обриви, канали, канами, русла річок, берегові лінії, інженерні споруди в масштабі карти) є на порядок нижчою. Різка зміна характеристик рельєфу в таких місцях зумовлює необхідність зменшення кроку моделі для адекватного відображення реальної ситуації. Оскільки інструментальні засоби не всіх сучасних ГІС мають розширений функціонал для такого роду операцій, то існує необхідність в окресленні ряду практичних дій для реалізації як висунутих положень, так і вимог стандарту [11], що також є необхідним і актуальним завданням.

Мета роботи – проаналізувати можливості побудови растрової гідрологічно-коректної цифрової моделі мікро- та мезорельєфу засобами ГІС GRASS з врахуванням структурних ліній рельєфу антропогенного та природного походження.

Об'єкт досліджень – цифрова модель рельєфу; **предмет дослідження** – інтеграція структурних ліній рельєфу та дослідження процесу оптимізації генерації ЦМР відповідно до існуючих стандартів.

Методика досліджень. Дослідження проводилися з використанням методів лінійної алгебри, обчислювальної математики, цифрового моделювання рельєфу, математичної статистики та інструментальних засобів ГІС GRASS 6.4 [17] у середовищі Debian GNU Linux 7.0 [18]. В якості основи досліджень було обрано тестову ділянку з насиченим мікро- та мезорельєфом, відповідний їй фрагмент топографічної карти М 1:10000 розміром 1465х941 м з інтервалом закладення горизонталей 1 м наведено на рис. 1а. Оцифрування ізогіпс здійснили векторизатором Easy Trace 7.99 [19], генерацію варіантів ЦМР з роздільною здатністю 0,5 м провели із застосуванням методу на основі регуляризованих напружених сплайнів (RST) [20] (модуль GRASS v.surf.rst [17, 21]) методом зворотньо-зважених відстаней та бікубічною сплайновою інтерполяцією з використанням регуляризації Тікунова (модулі v.surf.idw та v.surf.bspline відповідно) [17].

Виклад основного матеріалу. Для побудови базової ЦМР на вихідному картографічному матеріалі максимально можливою, як визначено рядом стандартів та нормативних документів, є точність, яка відповідає точності нанесення топографічної ситуації на топокарту (0,1 мм – 1 м на місцевості для масштабу 1:10000) [11, 22]. Проте для покращення відображення структурних ліній рельєфу в даному дослідженні горизонтальна роздільна здатність моделі була збільшена вдвічі, оскільки це знижує їх ступінчастість, яка впливає із особливостей структури ортогонального растру. Дигіталізація ізогіпс із використанням Easy Trace 7.99 забезпечила високу точність їх переводу у векторний формат без втрати точності оригінальної карти (рис. 1б).



а) фрагмент топографічної карти М 1:10000

б) дигіталізована ситуація (стрілками вказані 3d полілінії)

в) ЦМР з параметрами регуляризованого сплайну $\omega=60$ та $s=0$; шкала висот в м

Рис.1. Стадії підготовки та генерації ЦМР

Важливим моментом векторизації є дотримання ряду вимог нормативних документів [11]. При оцифруванні до базового набору горизонталей (картографічна модель рельєфу) були додані як тривимірні лінії (русло струмка, водовідвідні канали, контури яру та обривів), так і **2,5D** структурні лінії (берегова лінія водойми). Для коректної роботи інтерполятора додатково були нанесені окремі **3d** точки, які позначили центри локальних підвищень чи понижень, що діагностуються на карті, проте перевищення для яких на ній не вказано. Для формалізації задачі було прийнято, що у цьому випадку значення аплікати такої точки становитиме половину перерізу основних горизонталей.

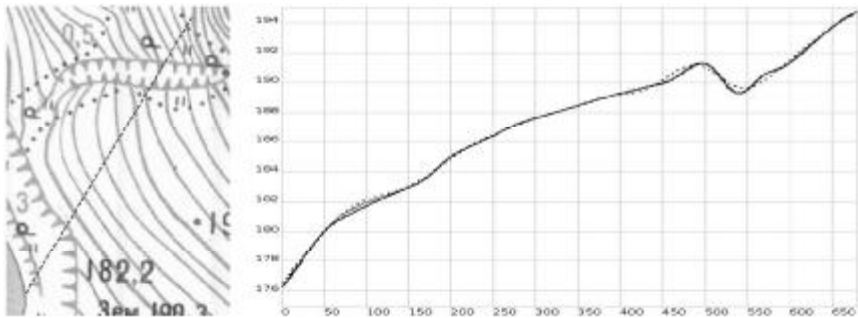
Додаткові **3d**-лінії були проведені по дну яру та по центру водовідвідного каналу. Важливими структурними лініями є контури обривів. Оскільки у стандарті [11] відсутні формалізовані вимоги до їх відображення у картографічній моделі рельєфу, було прийнято, що максимальна їх висота, вказана на топокарті, є такою лише у місці підпису і пропорційно знижується відповідно до загального тренду рельєфу та відміток висот точок горизонталей, які замикаються на обрив. Аплікати

точок лінії дна яру відповідають напису на карті і є меншими на 0,5 м відносно формуючого контуру.

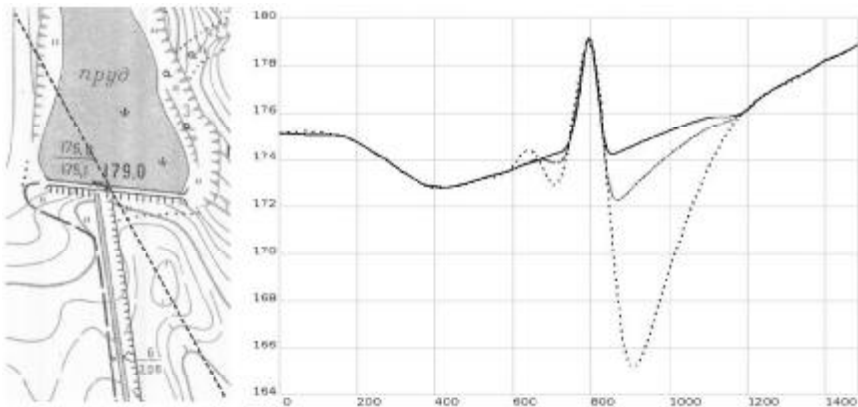
Для низки інженерних застосувань, зокрема для аналізу розподілу потоків дощової води та розробки протиерозійних заходів і робіт, необхідно враховувати штучні елементи рельєфу, які безпосередньо мають вплив на природні процеси на території, особливо на гідрологічний режим, і є стійкими в часі. Тому в моделі було враховано дамбу, яка має чіткі лінійні розміри та відому висоту – вона зображена 2,5d полілінією (рис. 16).

Досліджувані ЦМР із роздільною здатністю $\rho=0,5$ м (сітка 2930x1882 чарунок) була створені рядом методів: найкращі результати були отримані при використанні регуляризованих напружених сплайнів. Застосування інших методів, зокрема зворотньо-зважених відстаней та бікубічної сплайнової інтерполяції з використанням регуляризації Тікунова дали якісно та кількісно відмінні результати. Отримані поверхні містили ряд значних спотворень і артефактів, що спонукало до детальнішого розгляду методу RST. При генерації серії ЦМР використали такі параметри регуляризованого сплайну: напруженість $\omega=\{0; 20; 40; 60; 80; 100\}$ та згладженість $s=0$. Оскільки дослідження зосереджувалися на питаннях якомога точнішого відтворення структурних ліній рельєфу, кросс-валідаційна процедура [23, 24] для мінімізації RMSE у даному випадку не застосовувалася.

Аналіз трансект найхарактерніших елементів мезо- та мікрорельєфу останньої серії ЦМР показав, що при застосуванні параметрів напруженості ω 20, 40 та 60 отримуються найбільш близькі до реального рельєфу поверхні (рис. 2). Зокрема, значення $\omega=60$ надає максимально подібне слідування апроксимованої поверхні формам реального рельєфу. Відмітимо, що задовільно відтвореною є ерозійна форма рельєфу – невеликий яр та відображення обривів (рис. 2a), хоча показане у перерізі зображення вказує, що існує потенціал до їх поліпшеної реконструкції. Це можливо, насамперед, при введенні у картографічну модель додаткових 2,5 чи 3d ліній, які зобразять підніжжя обриву.



а)



б)

Рис.2. Трансекти характерних ліній рельєфу тестової ділянки:

--- $\omega=20$; ••• — $\omega=40$; — — $\omega=60$ (вертикальні та горизонтальні шкали в м)

Набагато гіршою є ситуація із відображенням інтерполюваного рельєфу на трансекті через став. Зумовлено це відсутністю ізобат для батиметричної поверхні цього водного об'єкта, тобто **2,5d** берегової лінії недостатньо для побудови змішаної поверхні. Тому при таких дослідженнях цифрова картографічна модель рельєфу повинна доповнюватися або реально вимірними значеннями ізобат, або встановленням їх величин на основі експертного підходу. Ці опорні лінії оптимізують стабілізацію параметрів сплайну як на площі водного дзеркала, так і за його межами й, відповідно, покращиться кінцева **3d**-модель (рис. 3).



Рис.3. Перспективний 3d-вигляд драпованої топографічною картою ЦМР ($\omega=60$)

Обов'язковою умовою є введення у картографічну ЦМР додаткових 3d-поліліній дна каналів, струмків та річок (хоча це не обумовлено вимогами стандарту). Спроба такого поліпшення на прикладі водовідвідного каналу (рис. 16, вверху зліва), показала, що якість результуючої ЦМР різко дисонує з тими ділянками, де таке вдосконалення не проводилося. За такого варіанту подальший гідрологічний аналіз дозволяє отримувати набагато точніші результати як у формі, напрямках, силі потоків води, так і дослідженні місць можливої акумуляції наносів. Це має першочергове значення при плануванні та організації протиерозійних заходів.

Висновки. Шляхом моделювання встановлено, що введення до цифрової картографічної моделі рельєфу додаткових 2,5d та 3d ліній і точок за використання напружених регуляризованих сплайнів для апроксимації GRID-ЦМР дозволяє коректно відтворювати мезо- та мікрорельєф природного та антропогенного походження засобами вільної ГІС GRASS. З перспектив подальших досліджень у даному напрямі відмітимо дослідження можливостей застосування різного кроку моделі та параметрів напруженості регуляризованого сплайну для локальних ареалів з різкими перепадами аплікат та строкатістю геоморфологічних умов.

Список використаних джерел:

1. Lichtenstein A. Geospatial aspects of merging DTM with breaklines / A. Lichtenstein, Y. Doytsher // Proceedings of FIG Working Week. May 22-27, 2004. — Athens, Greece, 2004. — P. 1—15.

2. Weibel R. Digital terrain modeling / R. Weibel, R. M. Heller // *Geographical Information Systems: Principles and Applications* / ed. by D.J. Maguire, M.F. Goodchild and D.W. Rhind). — Vol. 1. — London : Longman, 1991. — P. 269—297.
3. Vaze J. High resolution LiDAR DEM – how good is it? / J. Vaze, J. Teng // *Proceedings of the MODSIM International Congress on Modelling and Simulation*, December, 2007. — Christchurch, New Zealand, 2007. — P. 692—698.
4. Pankaj K. A. From Point Cloud to Grid DEM: A Scalable Approach / Agarwal K. Pankaj, Lars Arge, Andrew Danner // *Proceeding 12th International Symposium on Spatial Data Handling*. — Springer-Verlag, 2006. — P. 771—788.
5. Cvijetinović Ž. Procedures and Software for High Quality TIN Based Surface Reconstruction / Ž. Cvijetinović, D. Mihajlović, M. Vojinović, M. Mitrović, M. Milenković // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 21st Congress. — Commission IV, WG IV/4. — Vol. XXXVII, Part B4. — China, 2008. — P. 629—634.
6. Бурштинська Х. В. Теоретичні та методологічні основи цифрового моделювання рельєфу за фотограмметричними та картометричними даними : автореф. дис. ... д-ра техн. наук / Х. В. Бурштинська. — Львів, 2003. — 40 с.
7. Скворцов А. В. Триангуляция Делоне и её применение / А. В. Скворцов. — Томск : Томский ун-т, 2002. — 128 с.
8. Карпінський Ю. О. Орографічно-триангуляційна цифрова модель рельєфу / Ю. О. Карпінський, А. А. Лященко // *Вісник геодезії та картографії*. — 2000. — № 3. — С. 28—32.
9. Mitasova H. Multiscale soil erosion simulations for land use management / H. Mitasova, L. Mitas // *Landscape erosion and landscape evolution modeling* (ed. by R. Harmon and W. Doe). — Kluwer Academic / Plenum Publishers, 2001. — pp. 321—347.
10. Дмитрук Ю. М. Використання моделей водної ерозії при розв'язанні прикладних завдань землеустрою: геоінформаційний підхід / Ю. М. Дмитрук, В. Р. Черлінка // *Землеустрій і кадастр*. — 2012. — № 1. — С. 12—18.
11. COY 742-33739540 0013:2010 — Правила цифрового опису рельєфу. Комплекс стандартів. База топографічних даних. — К. : Мінприроди України, 2010. — 34 с.
12. Vanek J. Terrain Reconstruction from Contour Lines / J. Vanek, B. Jezek, E. Milkova // *Proceedings of the 3rd International conference on Applied Informatics and Computing Theory (AICT '12)*, Spain, October, 2012. — Barcelona : WSEAS Press, 2012. — pp. 316—320.
13. Li J. A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists / J. Li, A. D. Heap. — Canberra : Geoscience Australia, 2008. — Record 23. — 137 pp.
14. Huang P. The derivation of skeleton lines for terrain features / Peizhi Huang, Lai Poh-Chin // *Geo-spatial Information Science*. — Vol. 5. — Is. 2. — 2002. — pp. 68—73.
15. Hengl T. Finding the right pixel size / T. Hengl // *Computers & Geosciences*. — 2006. — № 32. — pp. 1283—1298.
16. Дмитрук Ю. М. Вплив роздільної здатності ЦМР на точність вихідних даних при моделюванні процесів водної ерозії / Ю. М. Дмитрук, В. Р. Черлінка // *Фізична географія та геоморфологія : міжвідомчий науковий збірник*. — К., 2012. — Вип. 2 (66) — С. 95—102.
17. Geographic Resources Analysis Support System [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://grass.fbk.eu/>
18. Debian GNU Linux – the universal operating system [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.debian.org/index.en.html>
19. Easy Trace 7.99 [Електронний ресурс]. — Режим доступу : http://www.easytrace.com/site2/program/et799_ru
20. Mitašova H. Interpolation by Regularized Spline with Tension: I. Theory and Implementation / H. Mitašova, L. Mitaš // *Mathematical Geology*. — 1993. — Vol. 25, № 6. — P. 641—655.

21. Черлінка В. Р. Особливості виділення папілярів стоку засобами ГИС / В. Р. Черлінка // Біологічні системи. — 2012. — № 4. — Вип. 1. — С. 113—116.
22. Інструкція з топографічного знімання у масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 та 1:500 (ГКНТА-2.04-02-98) [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://zakon.rada.gov.ua/go/z0393-98>
23. Hofierka J. Optimisation of Interpolation Parameters Using Cross-validation / J. Hofierka, T. Sebecauer, M. Šúri // Digital Terrain Modelling. Lecture Notes in Geoinformation and Cartography / ed. R.J. Peckham, J. Gyozo. — Berlin : Springer-Verlag Heidelberg, 2007. — P. 67—82.
24. Дмитрук Ю. М. Прикладні аспекти генерації гідрологічно-коректних та екологічно-відповідних цифрових моделей місцевості / Ю. М. Дмитрук, В. Р. Черлінка // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. — Івано-Франківськ, 2013. — № 1 (7). — С. 126—131.

В.Р. Черлінка. Особенности построения растровой гидрологически-корректной цифровой модели микро- и мезорельефа средствами ГИС GRASS.

Рассмотрены возможности построения растровой гидрологически-корректной цифровой модели микро- и мезорельефа средствами ГИС GRASS с учетом структурных линий антропогенного и природного происхождения. Показано, что для получения адекватных результатов необходимо включать в базовую цифровую картографическую модель рельефа, которая является основой GRID-ЦМР, дополнительные 2,5 и 3d-линии и применять аппроксимацию регуляризованными напряженными сплайнами.

V. Cherlinka. Features of hydrologically correct raster digital model of micro- and mesorelief construction using GRASS GIS.

The possibility of building a raster hydrologic-correct digital models of micro- and meso-relief by means GRASS GIS on base of structural lines of anthropogenic and natural origin is considered. It has been shown that to obtain adequate results on the basic of digital mapping terrain model (which is the basis of GRID-DEM) should be included the additional 2.5 and 3d-line and used an approximation to regularized the spline with tension.